



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Département Génie des Procédés et Énergétique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Spécialité : Énergétique et Développement Durable

Présenté par

Madjida LAOUADI

Amélioration des Performances de l'évaporateur d'un réfrigérateur domestique par une conception à tubes enroulés.

Encadré par

Dr.Nassima MALLEM

ENSTI Annaba

Membres du jury :

Dr. Naouam BOUDINAR

Président

ENSTI-Annaba

Dr. Slimane NIOU

Examineur

ENSTI-Annaba

Dédicaces

À moi-même,

Je me dédie ce travail en hommage à ma persévérance, mon honnêteté et ma détermination. Pour avoir tenu tête aux difficultés sans jamais céder à la facilité, pour avoir cru en mes capacités et travaillé dur, sans jamais tricher ni abandonner. Ce parcours a été exigeant, mais j'ai su le traverser avec intégrité et courage.

À mon professeur préféré : mon père,

Merci de m'avoir toujours fait confiance, de m'avoir offert les meilleures conditions pour réussir. Merci pour tes visites pendant les examens, ton regard rassurant, et pour m'avoir donné tout ce dont j'avais besoin, au point que je n'ai jamais eu à me comparer aux autres. Tu as su m'apporter stabilité, force et sérénité. Merci d'être, tout simplement, le meilleur papa du monde.

À ma meilleure docteur: ma mère

Merci de croire en moi inconditionnellement. Merci pour tes prières, tes sacrifices silencieux et ton amour infini. Ta présence est mon ancrage, ton sourire ma lumière. Tu es mon refuge et mon inspiration.

À mes deux pharmaciens préférés : ma sœur Maha et mon frère Amine,

Merci pour votre énergie, vos sourires et votre amour qui m'ont portée, même à distance. Vos mots simples, vos blagues, votre affection m'ont tant aidée à garder le cap.

À ma petite sœur Maya, que j'aime de tout mon cœur.

À mon enseignante précieuse : Madame KERBOUA Kaouther ,

Merci de m'avoir fait aimer ma spécialité dès la première séance de transfert de chaleur. Votre pédagogie, votre douceur et votre passion ont marqué un tournant dans mon parcours. Grâce à vous, j'ai su que j'étais au bon endroit.

À ma meilleure amie Roua,

Merci pour ton amour constant, ta présence fidèle, tes messages d'encouragement et tes silences remplis de compréhension. Tu as été ma force dans mes fragilités, mon rire dans mes larmes. Je te dois beaucoup.

À mes proches les plus chers : Menna, Narimane, Nihel, Fatma, Oulfa, Quods, Basmala,

Merci d'avoir été là, sans jamais faillir. Votre tendresse, vos encouragements, vos attentions discrètes ont coloré ces années d'une chaleur précieuse. Ce projet vous est dédié.

À mes amies : Ikram, Yasmin, Lilia, Merci d'avoir illuminé ces trois années de rires, de confidences et de folie douce. Vous avez été ma bulle de bonheur dans le tumulte des cours et des examens. Merci pour les souvenirs que je garderai pour toujours.

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la foi nécessaires pour mener à bien ce travail. Dans les moments de doute et de difficulté, c'est vers Lui que je me suis tournée, et Sa présence m'a portée tout au long de ce parcours.

*Je tiens à remercier profondément ma promotrice, le **Professeur Mme MALLEM Nassima**, pour sa gentillesse, sa patience et son soutien inestimable. Elle a toujours été présente à chaque étape de mon projet, avec des mots simples mais puissants qui m'ont motivée à ne jamais baisser les bras. Dans les moments où je doutais de moi, elle a su raviver ma confiance et me pousser à continuer. Merci infiniment pour votre humanité, votre sourire rassurant, et votre manière unique de rendre le travail plus léger. J'ai eu beaucoup de chance d'être encadrée par une personne aussi bienveillante et inspirante.*

Je remercie chaleureusement les ingénieurs de l'entreprise Brandt, pour leur accueil bienveillant et leur précieuse collaboration. Leur professionnalisme et leur générosité dans le partage de leurs connaissances ont grandement enrichi mon expérience.

*Ma reconnaissance la plus sincère va à **Mr Mustapha Yaïche**, ingénieur au laboratoire, qui m'a soutenue à chaque instant de ma présence sur le terrain. Toujours disponible, à l'écoute, répondant à mes questions sans jamais hésiter, il ne m'a jamais laissée sans aide ni explication. Je lui suis profondément reconnaissante pour sa gentillesse, sa patience et sa grande générosité.*

*Je remercie également **Mr Ehlal**, pour m'avoir acceptée au sein de l'entreprise et m'avoir donné l'opportunité d'explorer un lieu aussi stimulant. Grâce à lui, j'ai pu découvrir un environnement technique passionnant qui m'a beaucoup marquée.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à l'ingénieur **Mohamed** et l'ingénieure **Hassna**, pour leur disponibilité, leurs explications claires et leur accompagnement tout au long de cette belle aventure.*

*Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes enseignants de l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie d'Annaba, pour leur dévouement, leur passion et leur capacité à transmettre bien plus qu'un savoir : une vraie motivation. Un merci tout particulier à **Mr Othmani**, **Mr Belmadi**, **Mr Kahaleras**, **Madame Regami**, **Madame Boudinar**, et à tous les autres enseignants qui ont contribué à me faire aimer mes études.*

ملخص

تركز الدراسة على تبني مبخّر ثلاجة بتبريد ساكن باستخدام هندسة جديدة تعتمد على الأنابيب الملفوفة، مقارنة بالتصميم التقليدي للأنابيب المتعرجة. أجرينا اختبارًا مناخيًا واختبارًا للطاقة لقياس الفروق بين التصميمين من حيث الأداء الحراري وكفاءة التبريد. هدف الدراسة هو تقييم أداء المبخّر الجديد مع تقليل كمية المواد المستخدمة في التصنيع، مما يخفض التكلفة دون التأثير على جودة التبريد، ويحسن تصنيف الطاقة للنظام. **الكلمات المفتاحية:** المبخّر، الأنابيب الملفوفة، الأنابيب المتعرجة، كفاءة التبريد، الاختبار المناخي، اختبار الطاقة، تصنيف الطاقة.

Abstract:

The study focuses on the adoption of a refrigerator evaporator with static cooling using a new geometry based on coiled tubes, compared to traditional serpentine tube design. We conducted a climatic test and an energy test to measure the differences between the two designs in terms of thermal performance and cooling efficiency.

The objective of the study is to evaluate the performance of the new evaporator while reducing the amount of materials used in manufacturing, which lowers the cost without affecting cooling quality, and improves the system's energy rating.

Keywords: evaporator, coiled tubes, serpentine tubes, cooling efficiency, climatic test, energy test, energy rating.

Résumé:

L'étude se concentre sur l'adoption d'un évaporateur de réfrigérateur à refroidissement statique utilisant une nouvelle géométrie basée sur des tubes enroulés, comparée à la conception traditionnelle à tubes hélicoïdaux.

Nous avons effectué un test climatique et un test énergétique pour mesurer les différences entre les deux conceptions en termes de performance thermique et d'efficacité de refroidissement. L'objectif de l'étude est d'évaluer la performance du nouvel évaporateur tout en réduisant la quantité de matériaux utilisés dans la fabrication, ce qui diminue le coût sans affecter la qualité du refroidissement, et améliore le classement énergétique du système.

Mots-clés : évaporateur, tubes enroulés, serpent, efficacité de refroidissement, test climatique, test énergétique classement énergétique

Table des matières

Résumé	
Liste des abréviations & nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	2
Chapitre 1 :description de Brandt Algérie, Motivation et Problématique	
1.1.Présentation de la société Brandt Algérie :	5
1.1.1 Présentation socio-économique de l'entreprise :.....	5
1.1.2.Présentation du Département Recherche et Développement (R&D) :.....	6
1.2. Motivation :	6
1.3. Problématique :	7
Chapitre 2 :État de l'art et recherche bibliographique.	
2.1. Système de réfrigération statique :	9
2.1.1. Principe général du système de réfrigération :	9
2.1.2. Explication du cycle frigorifique à compression de vapeur :.....	9
2.1.3. Rôle de l'évaporateur dans le cycle frigorifique :.....	10
2.2. État de l'art :	10
2.2.1. Introduction :	10
2.2.2. Géométries des évaporateurs en serpentin.....	10
2.2.3. Limites de la géométrie en serpentin.....	10
2.2.4. Adaptation de nouvelles géométries d'évaporateurs.....	10
2.2.5. Travaux de recherche sur les nouvelles géométries:	11
Chapitre 3 : Étude expérimentale	
3.1. Introduction	13
3.2. Test de performance climatique :	13
3.2.1. Objectifs du test :.....	14
3.2.2. Équipements et matériaux simulés	14
3.2.3. Conditions expérimentales :	15
3.2.4. Positionnement des détecteurs :	15
3.2.5. Températures considérées dans le cadre du test :.....	16
3.2.6. Tests aux extrêmes de la plage climatique ST:	16
3.3.7. Traitement des données :.....	17
3.3. Test classe énergétique :.....	17
3.3.1. Objectifs :	17
3.3.2. Méthodologie expérimentale.....	18
3.3.3. Conditions expérimentales	18
3.3.4. Critères de performance thermique	18
3.3.5.: Critères de conformité selon les normes	19
3.3.6. Calculs et traitement des données	19

Chapitre 4 : Analyse, comparaison et discussion des résultats

4.1. Introduction.....	22
4.2. Analyse des résultats de test climatique :	22
4.2.1. Les résultats à température $T = 16^{\circ}\text{C}$:	22
4.2.2. Les résultats à température $T = 38^{\circ}\text{C}$:	23
4.2.3. Analyse énergétique du compresseur selon la géométrie de l'évaporateur	25
4.3. Résultats test classe énergétique :	26
4.3.1. Comparaison des Performances Énergétiques selon le Type d'Évaporateur : ..	26
4.3.2. Analyse des résultats :	27
4.3.3. Calculs des Paramètres Techniques et Énergétiques :	27
4.3.4. Évaluation de la performance énergétique des deux configurations	29
4.4. Conclusion :	30
Conclusion Générale	30
Références bibliographiques	34

Liste des abréviations & nomenclature

1/Abréviations:

Abréviation	Signification
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
ST	Subtropical (classe climatique)
T	Tropical (classe climatique)
N	Tempéré (classe climatique)
SN	Tempéré élargi (classe climatique)

2/Nomenclature:

Symbole	Signification
T1,T2,T3	Température (°C).
Tma	Température moyenne d'entreposage de la zone fraîche(°C)
SCa	Consommation Spécifique Annuelle(kWh/an)
W	Consommation énergétique réelle(kWh/an).
IEE	Indice d'efficacité énergétique
TH	Facteur thermique
CC	Facteur constructif .
BI	Facteur de correction des balconnets internes.
N	Constante réglementaire définie par la norme .
Tcma	Ttempérature moyenne de la zone modérée(°C).
t**	Température maximale dans un compartiment 2 étoiles (°C)
t***	Température maximale dans un compartiment 3 étoiles (°C)
TCFI	Facteur de correction total du volume interne
Vaju	Volume ajusté(L)

Liste des figures:

Figure 1 .1. Plan de l'usine du Guedjel	5
Figure 2.1. Description détaillée du cycle de réfrigération.....	9
Figure 3.1. Évaporateur à ancienne géométrie en serpentin.....	13
Figure 3.2. Évaporateur à géométrie à tubes enroulés.....	13
Figure3.3. Méthode d'estimation de la consommation journalière à partir des courbes de température et de puissance.....	20
Figure 4.1. Les températures moyennes enregistrées dans les deux évaporateurs-congélateur à T =16 °C.....	23
Figure4.2. Les températures moyennes enregistrées dans les deux évaporateurs-Réfrigérateur à T =16 °C.....	23
Figure 4.3. Températures moyennes des deux évaporateur-Congélateur à T=38°C	24
Figure 4.4. Températures moyennes des deux évaporateur-Réfrigérateur à T=38°C.....	24
Figure 4.5. Taux d'utilisation du compresseur selon la géométrie de l'évaporateur à T = 16 °C.....	25
Figure 4.6. Taux d'utilisation du compresseur selon la géométrie de l'évaporateur à T = 38°C.....	25
Figure 4.7. Comparaison des performances énergétiques selon la géométrie d'évaporateur.....	29

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Classes Climatiques Basées sur les Plages de Température Ambiante	14
Tableau 3.2. Composition d'un paquet d'essai (pour 1000 g).....	15
Tableau 3.3. Composition alternative d'un paquet d'essai (pour 1000 g).....	15
Tableau.3.4. Normes et critères de performance thermique.....	16
Tableau 4.1. Températures moyennes relevées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur pour les deux géométries de l'évaporateur.....	22
Tableau 4.2. Températures moyennes relevées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur pour les deux géométries de l'évaporateur à $T=16^{\circ}\text{C}$	24
Tableau4.3. Température moyenne relevées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur pour les deux géométrie de l'évaporateur à $T=38^{\circ}\text{C}$	26
Tableau 4.4. Résultats des deux essais de consommation énergétique pour la géométrie à tube enroulé.....	26
Tableau 4.5. Détermination des Volumes Ajustés des Différents Compartiments.....	28
Tableau.4.6. Les résultats obtenus pour chaque type d'évaporateur.....	29
Tableau 4.7. Classement Énergétique des Configurations d'Évaporateur.....	29

Introduction Générale

La conception et l'innovation industrielles concernent l'efficacité énergétique, en particulier dans les appareils électroménagers. La quantité d'énergie que le monde utilise augmente, mais les règles qui le contrôlent deviennent plus strictes et les personnes qui l'utilisent veulent que cela fonctionne bien et soit bon pour l'environnement. Les fabricants sont obligés d'adopter une approche complète et stricte, englobant l'optimisation de l'énergie, la réduction des coûts de la production et la réduction de l'impact environnemental.

L'ingénieur en énergie a un rôle important dans cette situation, non seulement en se concentrant sur le dimensionnement thermique de base, mais en identifiant également les plus petites façons possibles de s'améliorer. La compréhension actuelle est qu'une augmentation de 1% de l'efficacité énergétique peut entraîner des avantages importants en termes de consommation, de rentabilité et d'impact environnemental à grande échelle. .

Le circuit de réfrigération a un processus d'amélioration continu, et cette étude se concentre sur l'un de ses éléments clés : l'évaporateur. La façon dont un réfrigérateur est conçu affecte la façon dont il garde les choses froides et combien cela coûte. Dans le passé, l'évaporateur était généralement fait de serpentins en aluminium. Cette solution ait fait ses preuves, elle présente plusieurs inconvénients : une répartition inégale de la chaleur, une consommation importante de matériau, ainsi qu'un processus de conception long et exigeant.

Une nouvelle méthode de fabrication d'un évaporateur, utilisant des tubes enroulés au lieu du serpentins traditionnels, a été proposée afin de surmonter les limitations du design précédent. Cette configuration permet une circulation plus fluide, répartit les réfrigérants plus uniformément, utilise moins d'aluminium et le rend plus simple à faire. La société Brandt Algérie, acteur majeur du marché des appareils électroménagers en Algérie, a développé ce projet à travers son département de recherche et développement et son laboratoire froid.

Pour évaluer l'efficacité de ce nouveau design, deux types de tests ont été réalisés : le premier pour analyser son comportement face à différentes températures : test de classe climatique, et le second pour mesurer sa consommation électrique ainsi que sa classification énergétique. L'objectif était de montrer que la nouvelle forme peut correspondre ou dépasser les performances de l'ancienne forme et offrir des avantages substantiels et abordables.

Cette façon de concevoir les produits possibles n'est pas seulement une nouvelle technologie, mais une façon de penser qui montre le respect de l'environnement, de l'économie et des clients. Ce travail propose une étude approfondie, basée sur un test minutieux, sur le potentiel de modifier une partie vitale du système de réfrigération en considérant les facteurs techniques et économiques et environnementaux ; l'amélioration de l'évaporateur dans les réfrigérateurs à froid statique.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres, dont voici un bref aperçu :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente l'entreprise Brandt Algérie ainsi que son environnement industriel. Il décrit ses principales activités, sa position sur le marché national et international, ainsi que les principaux défis auxquels elle est confrontée. Une attention particulière est portée

au département de Recherche et Développement, à son organisation, à ses missions et aux objectifs qui ont motivé le lancement du présent projet d'optimisation. Ce chapitre se termine par la formulation précise de la problématique étudiée : l'amélioration de l'évaporateur dans les réfrigérateurs à froid statique.

Chapitre 2 : L'objectif de ce chapitre est de présenter le cadre théorique relatif aux systèmes de réfrigération, en mettant l'accent sur le fonctionnement du cycle frigorifique et sur les composants responsables de la production de froid, notamment l'évaporateur. Une revue bibliographique est ensuite proposée, traitant des différentes conceptions d'évaporateurs existantes. Les avantages et les limites des configurations classiques sont comparés par rapport aux conceptions récentes. Enfin, les nouvelles géométries de tubes roulés sont analysées à la lumière des principes et mécanismes physiques qui justifient leur efficacité.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre la méthodologie suivie pour la réalisation des essais comparatifs entre les évaporateurs à serpentin et ceux à tubes enroulés est présentée. Il décrit aussi les conditions climatiques et énergétiques dans lesquelles les tests ont été menés, les équipements et instruments utilisés, ainsi que les protocoles expérimentaux appliqués. Les critères de performance et les indicateurs retenus pour l'évaluation sont également précisés. Enfin, les différentes démarches entreprises pour assurer la fiabilité, la précision et la reproductibilité des résultats obtenus sont clairement exposées.

Chapitre 4 : L'analyse des résultats expérimentaux obtenus au cours des essais est mise en évidence dans ce chapitre. Les performances thermiques et énergétiques des deux géométries d'évaporateurs (à serpentin et à tubes enroulés) sont comparées de manière détaillée. Les gains apportés par la nouvelle conception sont discutés en termes d'efficacité technique, de réduction des coûts et d'impact environnemental. Enfin, une réflexion est menée sur les perspectives d'industrialisation du nouveau design, en abordant les éventuels défis à relever, les axes d'amélioration possibles, ainsi que les opportunités de développement futur.

Chapitre 01 :
Description de Brandt Algérie,
Motivation et Problématique

1.1. Présentation de la société Brandt Algérie :

Brandt Algérie – Samha est une entreprise spécialisée dans la conception, la fabrication et la distribution d'appareils électroménagers, filiale du groupe Cevital depuis l'acquisition du groupe français Brandt en 2014. Elle dispose d'un important complexe industriel implanté à Guidjel, dans la wilaya de Sétif, s'étendant sur 110 hectares. Ce complexe se compose de 6 unités principales il est en service, elles sont 4 représentées sur la figure suivante (Figure 1) et sont comme suit :

- **L'unité de métal** : dédiée au stockage, au découpage et à l'usinage de toutes les pièces métalliques.
- **L'unité de réfrigération** : chargée de la production et du montage des équipements de réfrigération.
- **L'unité d'injection plastique** : assure l'injection de toutes les pièces plastiques, avec plus de 100 moules couvrant les besoins du site.
- **L'unité de logistique** : responsable du transport et de la distribution des produits finis.
- **L'unité de lavage** : spécialisée dans la production et l'assemblage des machines à laver et lave-vaisselle.
- **La centrale électrique** : composée de 4 générateurs, chacun d'une capacité de 11 kilowatts, garantissant l'autonomie énergétique du site.



Figure 1.1. Plan de l'usine du Guedjel

1.1.1 Présentation socio-économique de l'entreprise :

Dénomination officielle : SAMHA Home Appliance / Brandt Algérie

Activité principale : Conception, fabrication et distribution d'appareils électroménagers

Types de produits fabriqués : Réfrigérateurs congélateurs lave-linge lave-vaisselle cuisinières fours téléviseurs climatiseurs équipements multimédias

Nombre d'employés : Environ 7 500 salariés

Capacité de production annuelle : Jusqu'à 8 millions d'appareils électroménagers

Taux d'intégration industrielle : Approximativement 80 % des composants sont fabriqués localement

Localisation du site industriel : Usine implantée dans la commune de Guidjel, wilaya de Sétif

Siège social :Route de Batna, BP 78 – Sétif 19000, Algérie

□ Tél/Fax : 036 62 51 41

1.1.2. Présentation du Département Recherche et Développement (R&D) :

Le Département Recherche et Développement (R&D) présente Le Moteur de l'innovation de l'entreprise est le Brandt. sa mission est de produire des appareils de maison de haute qualité qui sont économes en énergie et adaptés aux marchés nationaux et internationaux. Il joue un rôle clé dans le développement industriel des sociétés.

Deux composants sont intégrés dans ce groupe:

- **Le pôle numérique** :qui est basé sur des logiciels de modélisation, la simulation thermique et la conception assistée par ordinateur (CAD), est utilisé pour produire des solutions scientifiques innovantes.
- **Le pôle expérimental**, chargé des essais, de la validation des performances, et du prototypage dans des laboratoires spécialisés.

Le **laboratoire de froid** est un élément central du R&D, dédié à :

- L'optimisation thermique des réfrigérateurs et congélateurs.
- L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques.
- La réduction des coûts de production par des approches techniques avancées.

1.2. Motivation :

L'optimisation des systèmes de réfrigération, en particulier les évaporateurs, est une pièce clé qui peut aider à augmenter l'efficacité énergétique et la compétitivité des appareils électroménagers. L'évaporateur, un composant clé du cycle thermodynamique des réfrigérateurs, joue un rôle essentiel dans l'établissement des échanges thermiques. Par conséquent, l'optimisation de sa configuration est donc cruciale pour augmenter le succès global des systèmes de réfrigération. Les réfrigérateurs statiques ont traditionnellement utilisé un évaporateur serpentin, un appareil de base qui est souvent moins efficace en termes d'échanges thermiques. Une idée innovante est de remplacer cette géométrie classique par un évaporateur par une forme tube enroulé. Ce changement de géométrie a la capacité d'intensifier les échanges thermiques, augmentant ainsi l'efficacité globale du système tout en réduisant l'utilisation des matériaux et des coûts de fabrication.

L'adoption de cette technologie présente plusieurs avantages :

- **Optimisation des performances thermiques** : La nouvelle géométrie permettrait de mieux distribuer le froid et d'augmenter l'efficacité thermique.

- **Réduction des coûts de production** : En utilisant moins d'aluminium et en automatisant une partie du processus de fabrication, la production devient plus rapide et moins coûteuse.
- **Réduction des coûts de maintenance** : La fabrication automatisée de l'évaporateur à géométrie de tubes enroulés minimise les risques de défaillance et améliore la durabilité du produit, réduisant ainsi les coûts à long terme.
- **Impact environnemental** : L'utilisation réduite de matériaux contribue à une empreinte écologique plus faible.

1.3. Problématique :

Dans le cadre de l'amélioration des performances des systèmes de réfrigération statique, l'optimisation d'une nouvelle conception d'évaporateur, en garantissant des performances égales ou supérieures, tout en optimisant les coûts de fabrication, de maintenance et d'assemblage. L'optimisation de la géométrie des évaporateurs est un composant essentiel pour améliorer l'efficacité des systèmes de réfrigération statique tout en abaissant les coûts de production. Bien que le système de serpentin traditionnel soit fonctionnel, il existe des limites concernant l'intensification des échanges thermiques et la simplification de la fabrication.

Ce projet propose une solution innovante qui est l'utilisation des tubes enroulés pour améliorer la livraison de réfrigérant et augmenter l'uniformité des surfaces d'échange thermique. Ce changement nécessite une réévaluation des performances thermiques. L'objectif est d'établir ce nouveau style dans un cadre de fabrication à grande échelle, dans le but d'assurer des résultats égaux ou meilleurs tout en abaissant les coûts de fabrication, de maintenance et d'assemblage.

Chapitre 02 :
État de l'art et recherche bibliographique.

2.1. Système de réfrigération statique :

2.1.1. Principe général du système de réfrigération :

Les réfrigérateurs se divisent principalement en deux catégories : les modèles à froid statique et ceux à technologie no Frost (pas de gel). Cette étude se concentrera sur les réfrigérateurs à froid statique, une technologie traditionnelle couramment utilisée dans les appareils de petite et moyenne taille.

Le principe de fonctionnement d'un réfrigérateur à froid statique repose sur un cycle naturel de circulation de l'air. L'air refroidi par l'évaporateur entre en contact avec les aliments et l'air ambiant, absorbant ainsi la chaleur et réduisant la température de l'espace réfrigéré. L'air chaud, étant moins dense, monte alors vers le haut de l'appareil, où il est refroidi avant de redescendre dans les zones inférieures. Ce processus permet de maintenir une température relativement homogène, quoique des différences thermiques puissent être observées entre le haut et le bas de l'appareil, phénomène accentué par l'augmentation du volume à réfrigérer. Bien que cette technologie présente des inégalités thermiques, elle demeure une solution économique, particulièrement adaptée aux réfrigérateurs de petite capacité.[1]

2.1.2. Explication du cycle frigorifique à compression de vapeur :

Le cycle frigorifique à compression de vapeur repose sur quatre étapes principales : compression, condensation, détente et évaporation. Ce processus thermodynamique permet de transférer la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur vers l'extérieur.

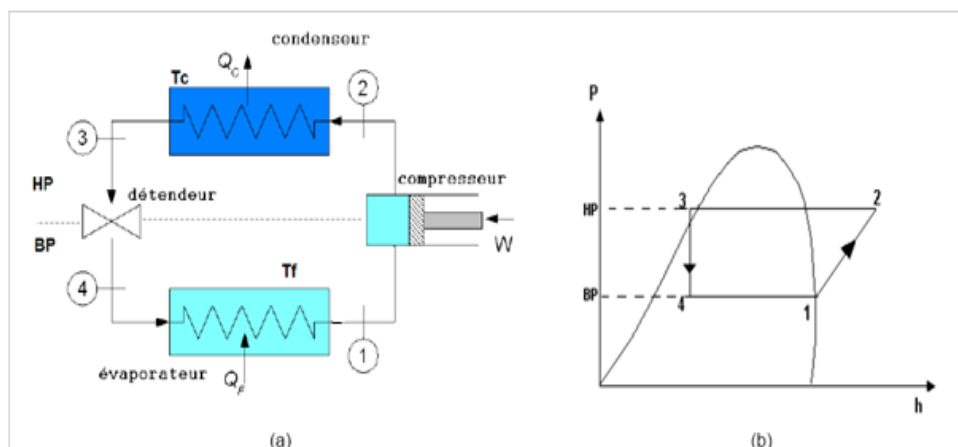


Figure 2.1. Description détaillée du cycle de réfrigération

- **Compression (1-2) :** Le fluide frigorigène sous forme de gaz à basse pression est aspiré par le compresseur. Ce dernier augmente la pression et la température du fluide, le transformant en un gaz chaud et comprimé.
- **Condensation (2-3) :** Le fluide gazeux à haute pression et température entre dans le condenseur où il cède sa chaleur à l'environnement. Le fluide se refroidit et se condense pour devenir liquide.
- **Détente (3-4) :** Le fluide liquide à haute pression passe par un détendeur. Cela entraîne une chute de pression et de température, ce qui permet au fluide d'être prêt pour l'évaporation.

- **Évaporation (4-1)** : Le fluide frigorigène à basse pression et température entre dans l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'espace réfrigéré, permettant ainsi de refroidir l'environnement à l'intérieur du réfrigérateur.

2.1.3. Rôle de l'évaporateur dans le cycle frigorifique :

L'évaporateur est l'élément clé qui permet au fluide frigorigène d'absorber la chaleur de l'environnement à refroidir, par le processus d'évaporation.[2] Le fluide, en changeant de phase de liquide à gaz, extrait la chaleur de l'air ambiant et aide ainsi à maintenir la température basse dans l'appareil.

2.2. État de l'art :

2.2.1. Introduction :

Dans les systèmes de réfrigération statique, la géométrie de l'évaporateur joue un rôle clé dans l'efficacité des échanges thermiques. Le modèle en serpentin, largement utilisé, présente des limites en termes d'uniformité de refroidissement et d'optimisation de l'espace. Ces contraintes ont conduit à des recherches sur de nouvelles géométries plus performantes, capables de réduire les pertes thermiques et les coûts de fabrication. Cette partie présente un aperçu des géométries classiques, leurs limites, ainsi que les approches récentes d'optimisation.

2.2.2. Géométries des évaporateurs en serpentin:

Le brevet [3] présente une géométrie d'évaporateur en serpentin, constituée d'un tube unique formant des sections linéaires reliées par des coudes, fixés à des ailettes. Ces coudes sont arrangés en colonnes selon la profondeur de l'évaporateur permettant au fluide frigorigène de se déplacer à travers eux. Cette configuration est couramment utilisée en raison de sa simplicité, mais elle présente des limites en termes d'efficacité thermique et de coûts de production.

2.2.3. Limites de la géométrie en serpentin

Plusieurs études ont souligné les limites de la géométrie en serpentin, notamment en termes d'uniformité thermique. une étude[4]à travers une simulation 3D sous ANSYS Fluent, a montré que la position et la forme du serpentin influencent fortement la convection naturelle de l'air. Des zones mortes, où l'échange thermique est faible, ont été identifiées. Par ailleurs, cette configuration présente plusieurs inconvénients notables : une consommation importante d'aluminium, perte d'efficacité thermique, complexité de fabrication avec plusieurs opérations manuelles et risque de corrosion ou de fuite au niveau des soudures.

2.2.4. Adaptation de nouvelles géométries d'évaporateurs

Une étude de Demesa [4]a montré que l'utilisation de tubes hélicoïdaux enroulés constitue une alternative efficace aux serpentins traditionnels. Cette géométrie optimise le transfert thermique en générant une turbulence favorable. Elle permet également de réduire la quantité de matériau utilisé, améliore la surface d'échange thermique et facilite l'intégration dans des systèmes compacts, tout en maintenant de bonnes performances.

2.2.5. Travaux de recherche sur les nouvelles géométries:

- Tosun et al (2020)[2] ont mené une étude expérimentale sur l'optimisation des échangeurs de chaleur dans un système à deux circuits avec by pass. Cette étude met en évidence que des changements dans la géométrie de l'évaporateur peuvent améliorer l'efficacité énergétique
- Na et al. (2021) [5] ont réalisé une optimisation expérimentale et numérique de l'évaporateur, combinant visualisation de l'écoulement et modélisation thermique pour améliorer les performances des réfrigérateurs domestiques. Les résultats ont montré qu'il est possible de réduire la taille de l'évaporateur de 2,9 % sans perte de performance, en éliminant la zone de surchauffe à faible efficacité thermique. Ils ont observé une augmentation du COP de 6,2 %, et une amélioration de la capacité de refroidissement de 2,6 %. L'étude a également montré que la géométrie influence directement l'efficacité thermique de l'évaporateur.
- Une analyse comparative des géométries d'évaporateurs a été réalisée par Saidur et al. (2010) [6]. Leur étude a démontré qu'un évaporateur en tube enroulé sans ailettes permettait une réduction de 77 % de la masse de cuivre tout en conservant des performances thermiques acceptables. Ils ont également observé une diminution de l'accumulation de givre et une meilleure compacité du système, ce qui favorise l'optimisation de l'espace utile
- Une étude expérimentale sur les échangeurs de chaleur tube–tube (TTHE) a été menée par Patil et al. (2022)[7], dans le but de comparer l'efficacité thermique de différentes géométries, notamment des configurations droites et serpentines. Les résultats ont révélé qu'un agencement en serpentin comportant sept coudes permettait une amélioration de 17 % du coefficient global d'échange thermique par rapport à une configuration droite, sans augmentation significative de la perte de charge. Cette étude souligne l'importance du nombre optimal de coudes pour maximiser la performance thermo-hydraulique de l'échangeur.
- Une étude expérimentale menée par Kim et al. (2021)[8] a permis d'optimiser les performances d'un évaporateur domestique en supprimant l'huile de lubrification et en faisant fonctionner le compresseur en continu. Les résultats ont montré une augmentation de 2,6 % de la capacité de refroidissement, une réduction de 3,6 % de la consommation énergétique, et un gain de 6,2 % en COP. De plus, une réduction de 2,9 % de la taille de l'évaporateur a pu être réalisée sans perte de performance.

Chapitre 3:
Étude expérimentale

3.1. Introduction

Cette section décrit les essais réalisés pour évaluer l'impact du passage d'un évaporateur à serpentin à une géométrie de tubes enroulés. Avant de présenter les essais effectués, il est important d'introduire les deux configurations d'évaporateur étudiées: La première correspond à l'ancienne géométrie en serpentin, utilisée dans la version initiale de l'appareil. La seconde est une nouvelle géométrie à tubes enroulés, développée dans le but d'améliorer l'efficacité thermique et de réduire les coûts de fabrication.

Les figures suivantes illustrent ces deux configurations :

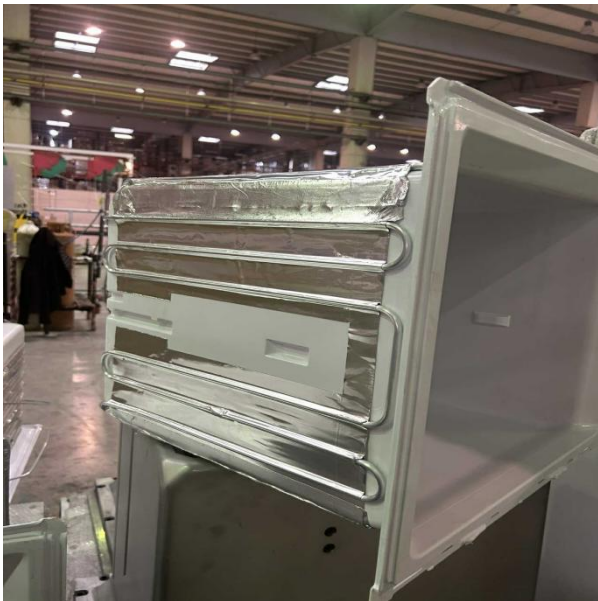


Figure 3.1.Évaporateur à ancienne géométrie en serpentin



Figure 3.2.Évaporateur à géométrie à tubes enroulés

Deux types de tests ont été réalisés pour évaluer cette configuration : l'un en classe climatique, l'autre en classe énergétique. L'objectif est d'analyser si cette nouvelle configuration permet de maintenir les performances thermiques tout en optimisant l'efficacité et les coûts du système. Dans cette étude, nous nous appuyons sur la norme internationale CEI 62552, qui spécifie les exigences de performance des unités de réfrigération nationales. Elle remplace l'ancienne norme ISO 15502. Cette norme garantit la cohérence des deux essais réalisés : en classe climatique et en classe énergétique.

3.2. Test de performance climatique :

C'est une procédure normalisée qui consiste à évaluer le comportement thermique de l'appareil dans des conditions ambiantes contrôlées, définies par sa classe climatique. Il permet de vérifier la capacité du réfrigérateur à maintenir des températures internes stables, tout en respectant les exigences de performance énergétique et de fiabilité.

3.2.1. Objectifs du test :

- Démontrer que malgré ce changement géométrique, les performances thermiques restent similaires, et que les valeurs mesurées respectent les exigences normatives, qui permet de valider la nouvelle configuration mise en place.
- Vérifier la conformité du réfrigérateur aux exigences thermiques fixées par la norme CEI 62552 sous classe climatique ST.
- Mesurer la température moyenne d'entreposage dans le réfrigérateur et la température au point le plus chaud dans le congélateur, sous deux conditions extrêmes : 16°C et 38°C.

Voici un tableau qui présente les différentes classes climatiques définies par la norme CEI 62552, basée sur les plages de température ambiante éligibles.

Tableau 3.1. Classes Climatiques Basées sur les Plages de Température Ambiante

Classe	Symbole	Plage de Température ambiante
Température élargi	SN	+10 à+32
Subtropical	ST	+16 à +38
Tropical	T	+16 à +43
Tempéré	N	+16 à+32

Dans le cadre de cette étude, la classe **ST** a été utilisée, car elle est la plus adaptée au climat subtropical de l'Algérie.

3.2.2. Équipements et matériaux simulés :

- **Enceinte climatique** : Elle permet de réguler précisément la température ambiante dans une plage comprise entre 16 °C et 38 °C, conformément à la classe climatique ST.
- **Les commandes de température (thermocouples)** : sont utilisées pour déterminer avec précision la température réelle à l'intérieur du réfrigérateur pendant les tests.
- **Logiciel utilisé** : Le Mure: ce logiciel prend en charge la surveillance en temps réel, l'enregistrement automatique et l'analyse des résultats mesurés.
- **Paquets d'essai**: ce sont des boîtes placées dans des compartiments de réfrigérateur et sont remplies d'un mélange standardisé imitant le comportement thermique des aliments. Ils agissent comme un référent de température dans les conditions des tests.

Voici ce qu'ils doivent contenir pour **1 000 g** de paquet :

Tableau 3.2. Composition d'un paquet d'essai (pour 1000 g)

Composant	Quantité (g)	Rôle
Oxy-éthyl-méthyl cellulose	230	Donne la texture
Eau	764.2	Complète le volume
Chlorure de sodium	5	Simule les propriétés physiques des aliments
6-chloro-m-crésol	0.8	Conservateur

Il existe également une formulation alternative des paquets d'essai, utilisée lorsque l'on souhaite abaisser le point de congélation à environ -5 °C, notamment pour des tests spécifiques en conditions plus sévères.

Tableau 3.3. Composition alternative d'un paquet d'essai (pour 1000 g)

Composant	Quantité (g)	Rôle
Oxy-éthyl-méthyl cellulose	232	Donne la consistance
Eau	725	Complète la masse et simule l'humidité des aliments
Chlorure de sodium	43	Ajuste les propriétés physiques
6-chloro-m-crésol	0.6	Conservateur

3.2.3. Conditions expérimentales :

Pour assurer la validité du test, il faut satisfaire les conditions suivantes :

- Stabilité thermique : la température ambiante doit rester **constante $\pm 0,5$ °C** durant toute la durée du test.
- Uniformité verticale : l'écart de température entre le sol et une hauteur de 2 mètres ne doit pas excéder 1°C/mètre.
- L'essai ne commence qu'une fois le régime permanent atteint, c'est-à-dire lorsque la température à l'intérieur du réfrigérateur se stabilise et que le compresseur redémarre pour entamer un nouveau cycle de fonctionnement.

3.2.4. Positionnement des détecteurs :

Température dans Deux Points Chauds:

L'un est situé à 350 mm gauche ou droite de la réfrigération (axe horizontal).

Un autre à 350 mm plus élevé ou plus bas (axe vertical).

La température moyenne est obtenue en faisant la moyenne des résultats pour chacun des deux capteurs dans le temps. Ainsi, il reste stable et représentatif.

3.2.5. Températures considérées dans le cadre du test :

Les températures ont été relevées à chaque point de mesure (T_1, T_2, T_3, \dots) à intervalles réguliers (chaque heure ou à une fréquence plus élevée) pendant toute la durée d'un cycle complet de fonctionnement du réfrigérateur. Ce cycle comprend le temps nécessaire pour atteindre la température de consigne ainsi que la phase d'arrêt du compresseur.

Pour chaque point, une moyenne des relevés a été calculée, ce qui donne les températures moyennes individuelles : $T_{1m}, T_{2m}, T_{3m}, \dots$.

Ensuite, la moyenne de ces valeurs permet d'obtenir la température moyenne d'entreposage :

- T_{ma} : température moyenne d'entreposage pour la **zone fraîche**
- T_{cma} : température moyenne d'entreposage pour la **zone modérée**

Voici un tableau qui présente les critères de performance à respecter associées à cette classe climatique :

Tableau3.4. Normes et critères de performance thermique :

Compartiment	Température cible	Tolérance	Symbole (étoiles)
Réfrigérateur	0 °C à 4 °C	± 0.5 °C	-
Congélateur ☆	≤ -6 °C	± 0.5 °C	Une étoile
Congélateur ☆ ☆	≤ -12 °C	± 0.5 °C	Deux étoiles
Congélateur ☆ ☆ ☆	≤ -18 °C	± 0.5 °C	Trois étoiles
Congélateur ☆ ☆ ☆ ☆	≤ -18 °C	± 0.5 °C	Quatre étoiles

3.2.6. Tests aux extrêmes de la plage climatique ST:

Afin de tester les performances d'un réfrigérateur dans des conditions extrêmes fixées pour sa classe climatique (ST), des mesures sont prises à deux températures ambiante de référence :

➤ À $T = 16^\circ\text{C}$:

Mesure de la température moyenne du réfrigérateur et mesure de la température au point le plus chaud du compartiment par niveau d'étoiles.

➤ À $T = 38^{\circ}\text{C}$:

Le même protocole de mesure est repris pour tester la stabilité des performances thermiques dans des conditions plus sévères.

3.2.7. Traitement des données :

Au cours de chaque cycle complet de fonctionnement, une mesure de température est enregistrée toutes les 60 secondes. Pour chaque point de mesure (T_1, T_2, T_3, \dots), la moyenne des relevés a été calculée, donnant ainsi les températures moyennes individuelles : T_{1m}, T_{2m}, T_{3m} , etc.

La moyenne de ces valeurs permet ensuite de déterminer la température moyenne d'entreposage :

- T_{ma} : température moyenne d'entreposage du réfrigérateur (zone fraîche)
- T_{cma} : température moyenne d'entreposage de la zone modérée, lorsque celle-ci est présente

3.3. Test classe énergétique :

Le test de la classe énergétique vise à évaluer la quantité d'énergie consommée par une unité de réfrigération sur une période donnée, dans des conditions bien définies. Cette démarche permet de juger de l'efficacité énergétique de l'appareil, principalement en fonction des températures atteintes dans les différents compartiments de stockage. Elle permet également de classer l'unité selon les exigences réglementaires en vigueur.

3.3.1. Objectifs :

Cette expérimentation a pour but de :

- Mesurer la consommation énergétique d'une unité de réfrigération dans des conditions standard afin de lui attribuer une classe énergétique conforme à la législation.
- Vérifier que l'appareil respecte les seuils d'efficacité imposés pour chaque type de compartiment.
- Étudier l'impact de la géométrie des évaporateurs sur la consommation d'énergie de l'appareil.

3.3.2. Méthodologie expérimentale :

La consommation d'électricité est déterminée à l'aide de deux méthodes :

- **Méthode directe** : le test est réalisé lorsque la température du compartiment atteint précisément la valeur cible.
- **Méthode par interpolation** : deux essais sont effectués à des températures différentes, et une interpolation linéaire est ensuite réalisée pour estimer la consommation à la température cible.

Il est important que la température durant le test reste très proche de la valeur visée, avec une tolérance maximale de ± 2 K. Lorsque les compartiments sont testés séparément, ceux qui ne sont pas concernés doivent être maintenus à leur température nominale, ou légèrement inférieure. La consommation totale est obtenue en additionnant les consommations de chaque compartiment.

3.3.3. Conditions expérimentales :

- **Température ambiante** : généralement fixée à 25 °C.
- **Durée du test** : 24 heures.
- **Unité des résultats** : les consommations sont exprimées en kWh/24 h avec deux décimales.

3.3.4. Critères de performance thermique :

Réfrigérateur (zone fraîche) : la température moyenne doit se situer entre 0 °C et 5 °C.

Congélateur : la température doit respecter les valeurs de référence (-12 °C pour les compartiments 2 étoiles et -18 °C pour les compartiments 3 ou 4 étoiles).

3.3.5. Critères de conformité selon les normes :

1. Chaque compartiment doit atteindre sa température cible.
2. La consommation mesurée doit correspondre à une température comprise dans une marge de ± 2 K autour de la valeur de consigne.
3. Si plusieurs réglages sont possibles, celui qui conduit à la plus faible consommation est retenu (notamment pour les compartiments à +5 °C ou +12 °C).
4. Chaque essai doit être effectué après stabilisation complète des températures, sans fluctuation importante.

Cas particulier : congélation

Dans le cas des compartiments de congélation, la température la plus chaude admissible est celle retenue pour l'évaluation de l'efficacité énergétique. Si cette température n'est pas atteinte, l'essai est répété avec des paramètres ajustés, et l'interpolation permet de déterminer la consommation à -18 °C.

3.3.6. Calculs et traitement des données :

➤ Volume ajusté :

C'est un volume standardisé (équation (1)) permettant de comparer l'efficacité énergétique entre les deux cas étudiés. Il dépend notamment de la température cible (équation (2)). Ce volume a été calculé afin d'être utilisé dans l'évaluation de la consommation énergétique.

$$V_{aju} = \sum(Vi \times TCFI) \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{aju} = \sum(Vi \times TF \times FF \times CC) \dots \dots \dots (2)$$

➤ Consommation énergétique journalière réelle :

La consommation énergétique journalière réelle a été déterminée par l'analyse de la courbe de puissance sur une période de 24 heures. Le logiciel Le Mure permet une visualisation précise des phases de fonctionnement du compresseur (périodes actives) et des phases d'arrêt (périodes inactives), ce qui rend possible une estimation de l'énergie consommée.

L'estimation repose sur l'intégration de la puissance électrique en fonction du temps, à partir des courbes enregistrées. Cette méthode reflète les conditions réelles d'utilisation, en tenant compte de plusieurs facteurs :

- La température ambiante,
- Le niveau de chargement de l'appareil,
- Le comportement thermique propre au réfrigérateur.

Pour affiner cette analyse, les températures mesurées ont été croisées avec les périodes de fonctionnement du compresseur, afin de mieux comprendre la dynamique thermique de l'appareil.

La figure ci-dessous, extraite du logiciel Le Mure, illustre les données collectées. On y distingue:

- La courbe de puissance électrique (en noir)
- La température du réfrigérateur (ligne rouge)
- La température du congélateur (ligne bleue)

La figure ci-dessous illustre cette démarche explicative.

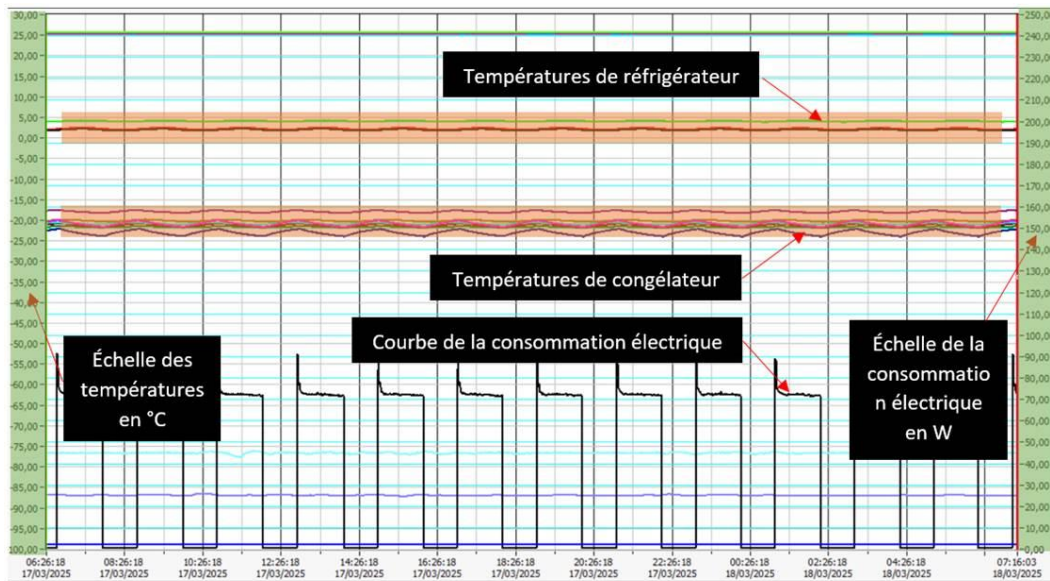


Figure3.3. Méthode d’estimation de la consommation journalière à partir des courbes de température et de puissance.

➤ **Consommation énergétique théorique (SCa) :**

La consommation d’énergie théorique, notée SCa, est une valeur qui permet d’estimer la quantité d’énergie utilisée par un dispositif de réfrigération lorsqu’elle est opérée dans des conditions spécifiques. La formule (équation (3)) est publiée dans une source officielle, comme une Gazette réglementaire ou un document ministériel officiel, et est utilisée comme référence pour évaluer la consommation d’énergie des appareils électroménagers. Cette formule est utilisée pour: comparez les performances de différents appareils, catégorisez les appareils en fonction de leur efficacité énergétique, et calculer l’indice d’efficacité énergétique (IEE).

Elle est exprimée en kWh/an, est calculée à l’aide de la formule suivante :

$$SCa = Ma \times \sum(Vaju \times \left(\frac{25-Tc}{20}\right) \times FF \times CC \times BI) + N \times CH.....(3)$$

➤ **Indice d’efficacité énergétique (IEE) :**

L’IEE (équation 4)) est un paramètre qui nous permet d’évaluer la consommation d’énergie réelle d’un système de réfrigération par rapport à la consommation théorique. La formule montre la quantité d’énergie utilisée dans des conditions réelles par rapport à l’énergie calculée à l’aide de la formule officielle:

$$IEE = \frac{W \times 100}{SCa}.....(4)$$

Chapitre 04 :
Analyse, comparaison et discussion des résultats

4.1. Introduction

Ce chapitre expose les résultats obtenus au cours des expériences énergétiques et climatiques afin de déterminer les effets de la nouvelle conception d'évaporateurs de tubes vallonnés. L'objectif principal est de déterminer si cette nouvelle configuration prolongera l'intégrité thermique des systèmes tout en réduisant les coûts opérationnels et en améliorant l'efficacité énergétique. Pour cela, une analyse comparative a été réalisée entre la géométrie conventionnelle des évaporateurs et la nouvelle conception tubulaire enroulée. Les deux systèmes ont été testés dans des conditions identiques pour déterminer leurs avantages et limitations respectifs.

4.2. Analyse des résultats de test climatique :

4.2.1. Les résultats à température $T = 16^{\circ}\text{C}$:

Des essais ont été effectués à une température ambiante de 16°C afin de comparer les performances de deux types d'évaporateurs en conditions réelles de fonctionnement. Le tableau ci-dessous présente les températures caractéristiques relevées dans différentes zones de l'enceinte frigorifique, ainsi que leur conformité par rapport aux exigences de la norme CEI 62552.

Tableau 4.1. Températures moyennes relevées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur pour les deux géométries de l'évaporateur à $T=16^{\circ}\text{C}$

Compartiment	Sous-compartiment [$^{\circ}\text{C}$]	Tmoy-géométrie enroulée [$^{\circ}\text{C}$]	Tmoy-géométrie Serpentin [$^{\circ}\text{C}$]	critères d'acceptation (CEI62552)
	Haut (T_1)	3.2	1.3	$0^{\circ}\text{C} \leq T_{1m} \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Milieu(T_2)	3.2	1.6	$0^{\circ}\text{C} \leq T_{2m} \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Bas(T_3)	4.3	2.6	$0^{\circ}\text{C} \leq T_{3m} \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Tmoy d'entreposage	3.5	1.9	$T_{ma} \leq 4^{\circ}\text{C}$
	2-étoiles	-21.65	-18.3	$t_{2*} \leq -12^{\circ}\text{C}$
	4-étoiles	-24.2	-21.15	$t_{4*} \leq -18^{\circ}\text{C}$

Les deux figures suivantes représentent les températures moyennes observées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur des deux géométries testées. Cette visualisation permet de mieux comparer les performances thermiques des configurations tubes enroulés et Serpentin.

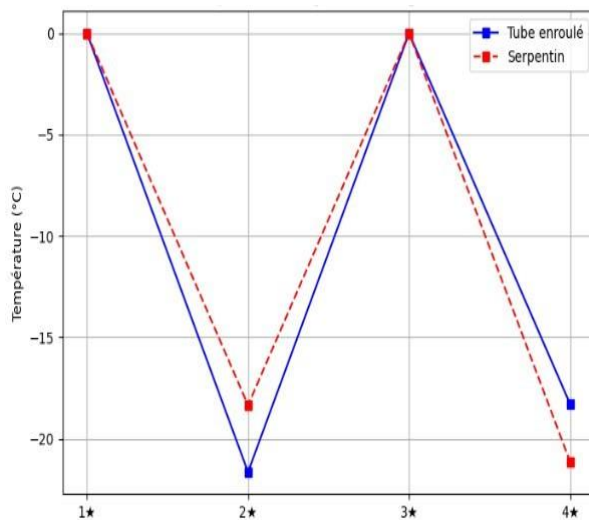


Figure 4.1. Les températures moyennes enregistrées dans les deux évaporateurs-congélateur à $T = 16\text{ °C}$

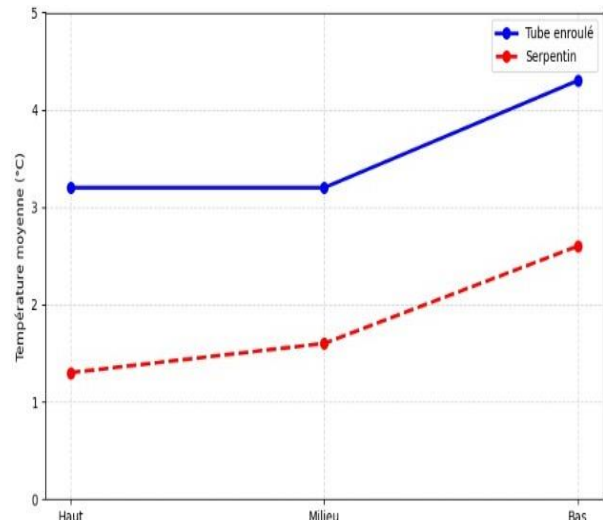


Figure 4.2. Les températures moyennes enregistrées dans les deux évaporateurs-Réfrigérateur à $T = 16\text{ °C}$

Interprétation des résultats à $T = 16\text{ °C}$:

Les résultats expérimentaux montrent que les deux configurations respectent les exigences de la norme CEI 62552, assurant ainsi des températures compatibles avec la conservation des aliments dans les compartiments réfrigérateur et congélateur.

Dans le compartiment réfrigérateur, bien que la géométrie serpentin affiche des températures légèrement plus basses, la configuration enroulée maintient des températures uniformes et stables, avec une moyenne de 3.5 °C , ce qui reste parfaitement conforme à la norme ($T_{avg} \leq 4\text{ °C}$). Cela indique une meilleure répartition thermique, avantageuse pour des cycles de régulation plus équilibrés et potentiellement moins énergivores.

Dans le compartiment congélateur, la géométrie enroulée se distingue clairement par des températures plus basses que celles de la géométrie serpentin : -21.65 °C contre -18.3 °C en 2 étoiles, -24.2 °C contre -21.15 °C en 4 étoiles.

Ces résultats traduisent une capacité de congélation supérieure, garantissant une marge de sécurité thermique plus large, bénéfique pour la conservation à long terme.

4.2.2. Les résultats à température $T = 38\text{ °C}$:

Le même test a été répété à une température ambiante de 38 °C , en conservant les mêmes conditions de mesure. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2. Températures moyennes relevées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur pour les deux géométries de l'évaporateur à T=38°C

Compartiment	Sous-compartiment [°C]	Tmoy- géométrie tube enroulé[°C]	Tmoy- géométrie Serpentin[°C]	critères d'acceptation (CEI62552)
	Haut (T1)	3.2	1.3	$0^{\circ}\text{C} \leq T1m \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Milieu(T2)	3.2	1.6	$0^{\circ}\text{C} \leq T2m \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Bas(T3)	4.3	2.6	$0^{\circ}\text{C} \leq T3m \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Tmoy d'entreposage	3.5	1.9	$Tma \leq 4^{\circ}\text{C}$
	2-étoiles	-21.65	-18.3	$t2^* \leq -12^{\circ}\text{C}$
	4-étoiles	-24.2	-21.15	$t4^* \leq -18^{\circ}\text{C}$

De même que pour la condition à T = 16 °C, le graphique suivant illustre les températures relevées à T = 38 °C pour chaque compartiment, ce qui permet de vérifier la constance thermique entre ces deux configurations.

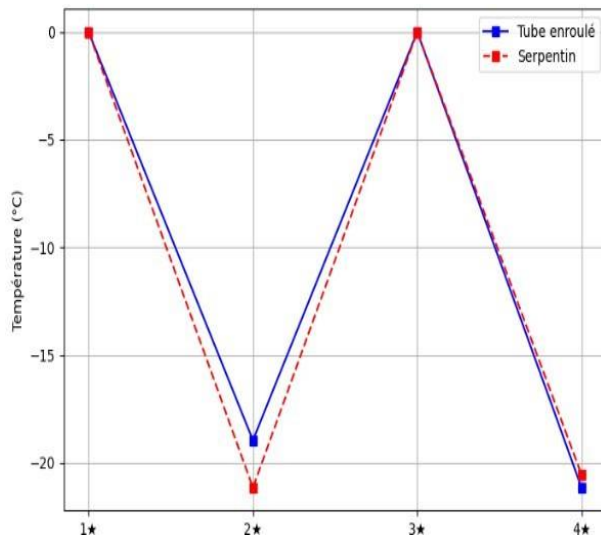


Figure4.3.Températures moyennes des deux évaporateur-Congélateur à T=38°C

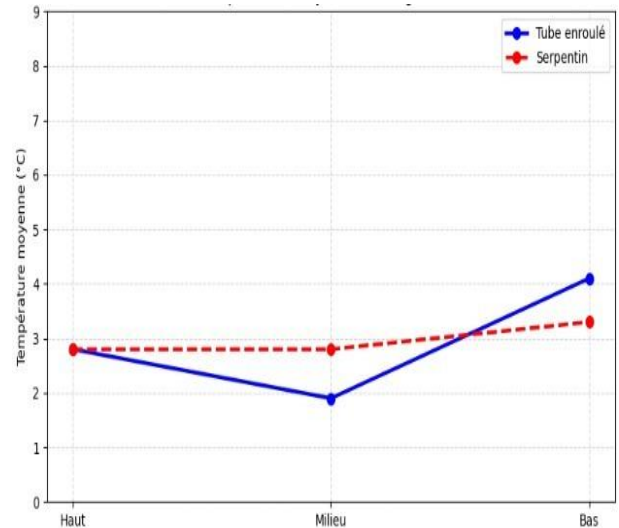


Figure4.4.Températures moyennes des deux évaporateur-Réfrigérateur à T=38°C

Analyse des résultats thermiques à T = 38 °C :

L'analyse des résultats à une température ambiante de 38 °C met en évidence la bonne performance de la géométrie à tubes enroulés, même sous des conditions climatiques sévères. Ce test, qui simule un environnement chaud typique des régions arides ou des périodes estivales,

constitue un indicateur clé de la robustesse thermique du système. Elle montre que, dans la zone réfrigérateur, Les températures sont proches dans le haut du compartiment pour les deux modèles.. En revanche, le modèle à tube enroulé présente de meilleures performances thermiques au centre (1,9 °C contre 2,8 °C).

Dans la zone congélateur, les deux géométries présentent des températures similaires. Toutefois, le tube enroulé atteint des valeurs plus basses dans les compartiments profonds (jusqu'à - 22,7 °C), ce qui peut favoriser une meilleure conservation des aliments.

4.2.3. Analyse énergétique du compresseur selon la géométrie de l'évaporateur

Les figures suivantes illustrent le taux d'utilisation du compresseur pour les deux configurations géométriques de l'évaporateur (serpentin et enroulé), sous deux températures ambiantes différentes : 16 °C et 38 °C.

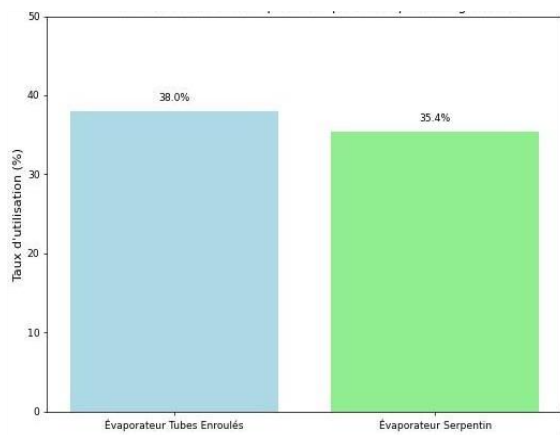


Figure 4.5. Taux d'utilisation du compresseur selon la géométrie de l'évaporateur à T = 16 °C

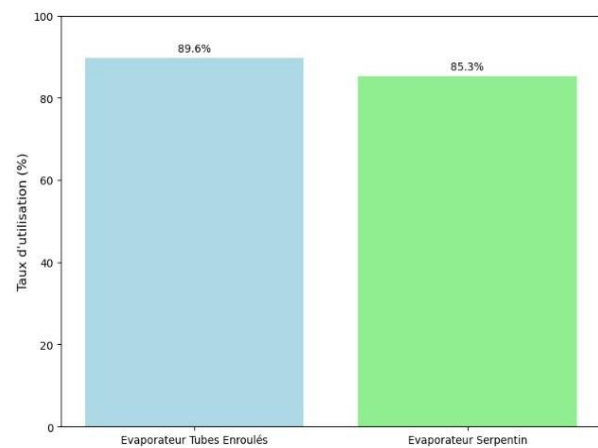


Figure 4.6. Taux d'utilisation du compresseur selon la géométrie de l'évaporateur à T = 38 °C

- À T = 16 °C, le compresseur associé à l'évaporateur enroulé présente un taux d'utilisation de 38 %, contre 35,4 % pour le modèle en serpentin.
- À T = 38 °C, cette tendance se confirme, avec des taux respectifs de 89,6 % (enroulé) et 85,3 % (serpentin).

Cette légère différence peut être attribuée à la géométrie des évaporateurs, qui influence directement les conditions d'échange thermique. L'évaporateur enroulé, grâce à sa forme plus compacte et à une surface d'échange potentiellement plus importante, favorise une meilleure absorption de chaleur. Cela se traduit par un fluide frigorigène arrivant au compresseur avec plus d'énergie, cet écart reste modeste et n'impacte pas négativement les performances globales du système.

4.3. Résultats test classe énergétique :

Les températures moyennes relevées lors du test de classe énergétique sont résumées dans le tableau suivant pour les deux géométries d'évaporateur.

Tableau 4.3. Températures moyennes relevées dans les compartiments réfrigérateur et congélateur pour les deux géométries de l'évaporateur.

Compartiment	Sous-compartiment [°C]	Tmoy-géométrie tubes enroulés		Tmoy-géométrie Serpentin[°C]	critères d'acceptation (CEI62552)
		Point chaud	Point froid		
	Haut (T1)	5.9	2.8	2.2	$0^{\circ}\text{C} \leq T1m \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Milieu(T2)	5.7	2.3	2.4	$0^{\circ}\text{C} \leq T2m \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Bas(T3)	7	3.9	2.6	$0^{\circ}\text{C} \leq T3m \leq +8^{\circ}\text{C}$
	Tmoy	6.2	3	2.3	$Tma \geq 5^{\circ}\text{C}$
	2-étoiles	-18.3	-20.3	-17.7	$t2^* \leq -12^{\circ}\text{C}$
	4-étoiles	-20.55	22.45	-21.5	$t4^* \leq -18^{\circ}\text{C}$

4.3.1. Comparaison des Performances Énergétiques selon le Type d'Évaporateur :

Les résultats de consommation énergétique ont été obtenus selon deux approches, adaptées aux conditions de température observées pour chaque géométrie d'évaporateur. Pour la géométrie en serpentin, un seul test a été réalisé. La température mesurée dans le compartiment réfrigérateur était proche de la température cible (3.0°C , légèrement inférieure à 4°C), ce qui a permis d'utiliser directement la méthode directe.

Pour la géométrie à tube enroulé, deux essais ont été effectués, à deux températures différentes dans le compartiment réfrigérateur :

- Point chaud : 6.2°C
- Point froid : 3.0°C

Ces valeurs sont présentées dans le tableau 4.4 ci-dessous, qui résume la température moyenne et la consommation énergétique mesurée lors des deux essais réalisés avec la géométrie à tube enroulé.

Tableau 4.4. Résultats des deux essais de consommation énergétique pour la géométrie à tube enroulé

Condition d'essai	Température moyenne du réfrigérateur (°C)	Consommation énergétique (Wh/24h)
Point chaud	6.2°C	908 Wh/24h
Point froid	3.0°C	1045.9 Wh/24h

➤ Cas de l'évaporateur serpentin :

Pour la géométrie en serpentin, la consommation énergétique mesurée directement lors du test unique est de:

$$W = 982.2 \text{ Wh/24h}$$

$$W = 359 \text{ kWh/an}$$

➤ Cas de l'évaporateur de tube enroulé :

Pour la géométrie à tube enroulé, la consommation énergétique à la température cible de 5.0 °C a été estimée par interpolation linéaire entre les deux essais (point chaud et point froid) selon la formule suivante :

$$W = W_1 + \left(\frac{T_{\text{cible}} - T_1}{T_2 - T_1} \right) \times (W_2 - W_1)$$

avec :

$$W_1 = 908 \text{ Wh/24h} \quad (T_1 = 6.2 \text{ °C} - \text{point chaud})$$

$$W_2 = 1045.9 \text{ Wh/24h} \quad (\text{à } T_2 = 3.0 \text{ °C} - \text{point froid})$$

$$T_{\text{cible}} = 5.0 \text{ °C}$$

$$W = 908 + \left(\frac{5 - 6.2}{3 - 6.2} \right) \times (1045.9 - 908) = 959.7 \text{ Wh/24h}$$

$$W = 350 \text{ kWh/an}$$

➤ Écart de consommation :

L'écart de consommation énergétique annuelle entre les deux géométries est :

$$\Delta W = 359 - 350 = 9 \text{ kWh/an}$$

La différence entre les deux consommations est de 9 kWh/an. Cet écart représente environ presque 3 % de consommation supplémentaire pour la géométrie en serpentin

4.3.2. Analyse des résultats :

La comparaison entre la géométrie traditionnelle en serpentin (982,2 Wh/24 h) et la configuration à tubes enroulés (959,7 Wh/24 h) met en évidence une légère amélioration de la performance énergétique. Cette réduction, bien que modeste, démontre que la nouvelle conception ne génère pas de surconsommation. Elle permet au contraire une meilleure gestion thermique, sans compromis sur le rendement global du système.

4.3.3. Calculs des Paramètres Techniques et Énergétiques :

➤ Calcul de volume ajusté :

Suivant l'équation de la détermination des volumes ajustés présentés au chapitre 3.

Le tableau ci-dessous présente la détermination des volumes ajustés des différents compartiments du réfrigérateur, en tenant compte des facteurs de correction thermique à chaque zone de stockage.

Tableau 4.5. Détermination des Volumes Ajustés des Différents Compartiments

Compartiment	Volume réel (L)	Facteurs de correction	Volume ajusté
Aliments frais	389 L	TH=1.1 , CC=1.1, BI=1	427,90
Partie deux étoiles	23,9 L	TH=1.85, FF=1 , CC=1.1, BI=1	48,53
Partie quatre étoiles	119 L	TH=2.15, FF=1 ,CC=1.1 , BI=1	281,44

On additionne tous les volumes ajustés

$$Vaju = (389 \times 1.1 \times 1.1) + (23.9 \times 1.85 \times 1) + (119 \times 2.15 \times 1.1) = 753.44L$$

$$Vaju = 427.90 + 48.53 + 281.44$$

$$Vaju = \mathbf{758L}$$

Ce volume ajusté est utilisé dans le calcul d'efficacité dans les 2cas.

➤ Résultat du Calcul de la Consommation Énergétique Mesurée :

On rappelle la formule de Sca :

$$SCa = Ma \times \sum \left(20Vaju \times \left(\frac{25 - Te}{20} \right) \times FF \times CC + BI \right) + N \times CH$$

Tel que :

$$Ma=0,777, Vaju=728, CC =1, BI =0, N=303, CH = 0,FF=1$$

$$SCa = 0.777 \times \sum \left(20 \times 758 \times \left(\frac{25 - 5}{20} \right) \times 1 \times 1 + 1 \right) + 303 \times 1$$

$$\mathbf{SCa = 891.86kWh/an}$$

➤ La consommation énergétique théorique calculée est identique dans les deux cas, malgré la différence de géométrie des évaporateurs.

Calcul de l'indice d'efficacité énergétique (IEE) :

L'IEE est déterminé à partir de la consommation annuelle réelle (W) et de la consommation théorique ajustée (SCa), les valeurs obtenues permettent de comparer l'impact de chaque géométrie d'évaporateur sur l'efficacité énergétique globale de l'appareil

Tableau.4.6. Les résultats obtenus pour chaque type d'évaporateur :

Typed'évaporateur	W(kWh/an)	SCa (kWh/an)	$I\alpha = \left(\frac{W}{Sca \times 100} \right)$	Iα (%)
<i>Tubes enroulés</i>	350	891,86	$\frac{366.03 \times 100}{891.86}$	39.28
<i>Serpentin</i>	359	891,86	$\frac{359 \times 100}{891.86}$	40,2

Les valeurs de l'indice d'efficacité énergétique (IEE) obtenues précédemment permettent d'attribuer une classe énergétique à chaque configuration. Le tableau suivant présente le classement énergétique correspondant à chaque type d'évaporateur, selon les seuils définis par la réglementation en vigueur.

Tableau 4.7. Classement Énergétique des Configurations d'Évaporateur :

Configuration de l'évaporateur	IEE	Classe énergétique attribuée	Le taux d'appartenance à la classe énergétique
Évaporateur enroulé	39.28 < 42	A+	22,17 %
Évaporateur serpentin	40.2 < 42	A+	16,00 %

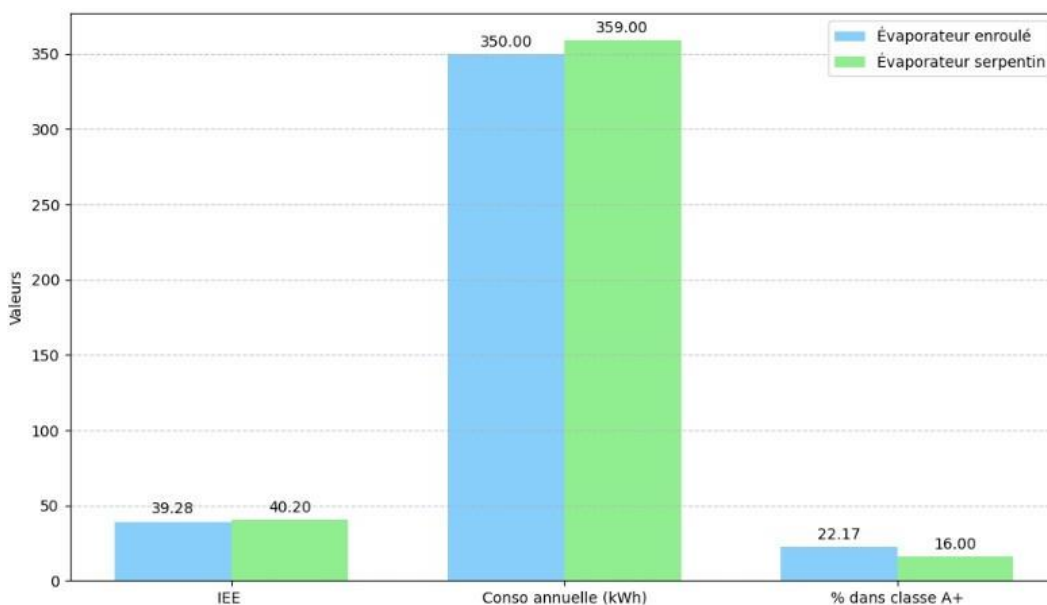


Figure 4.7. Comparaison des performances énergétiques selon la géométrie d'évaporateur

4.3.4. Évaluation de la performance énergétique des deux configurations d'évaporateur:

D'après les résultats du tableau et de la figure 4.7, l'évaporateur à tubes enroulés présente un indice d'efficacité énergétique (IEE) de 39,28, tandis que celui en serpentin atteint 40,20. Puisque l'IEE est un indicateur inversement proportionnel à l'efficacité, une valeur plus faible

indique une meilleure performance énergétique. Cela confirme que l'évaporateur à tubes enroulés est plus performant. Cette amélioration se traduit également par une consommation d'énergie quotidienne plus faible, ce qui contribue directement à une meilleure position dans la classe énergétique A+. Concernant le taux d'appartenance à la classe, l'évaporateur à tubes enroulés atteint 22,17%, contre seulement 16,00 % pour le serpent.

L'évaporateur enroulé est mieux positionné dans la classe A+ et plus proche du seuil d'une classe supérieure, ce qui confirme son efficacité énergétique.

4.4. Conclusion :

Les résultats de test classe climatique, qui ont été enregistrés à $T = 16^{\circ}\text{C}$ et $T = 38^{\circ}\text{C}$, montrent que les deux conceptions, le tube enroulé et le serpent, sont conformes à la norme CEI 62552 en matière thermique et énergétique. Les températures restent dans des limites acceptables, assurant une stabilité thermique fiable. L'utilisation de tubes roulés en général n'a pas d'impact significatif sur l'efficacité générale. En conséquence, les deux options ont des cotes de confiance similaires et élevées.

D'après les résultats de test classe énergétique, l'utilisation de la géométrie tube enroulé lancée en termes d'efficacité énergétique est un avantage significatif. Cette configuration améliore non seulement la position dans la classe A+, mais elle entraîne également une diminution substantielle de la consommation d'énergie quotidienne. Les performances des systèmes de réfrigération peuvent être améliorées en optimisant la forme de l'évaporateur, comme le montrent ces résultats.

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce travail de fin d'études était de proposer et d'évaluer une nouvelle configuration géométrique pour l'évaporateur d'un réfrigérateur à froid statique, en remplaçant la conception classique à serpentin par une géométrie à tubes enroulés. Ce changement, bien que simple en apparence, s'inscrit dans une démarche d'optimisation globale visant à améliorer les performances thermiques, l'efficacité énergétique et la rentabilité industrielle.

Dès le départ, la stratégie adoptée reposait sur un principe fondamental : maintenir, au minimum, les performances du système existant tout en réduisant les coûts de fabrication. Ce défi a été relevé avec succès, comme en témoignent les résultats expérimentaux issus des tests climatiques et des essais de classe énergétique. Les performances thermiques ont été rigoureusement évaluées à deux températures ambiantes extrêmes (16 °C et 38 °C), conformément à la norme CEI 62552. Les résultats montrent que la géométrie en tubes enroulés respecte parfaitement les critères normatifs, assurant une répartition efficace du froid et une stabilité thermique satisfaisante. C'est toutefois dans les résultats énergétiques que cette nouvelle conception a pleinement révélé son potentiel. Alors que notre ambition initiale était simplement de ne pas dégrader l'efficacité énergétique du système, les essais ont démontré une amélioration réelle et mesurable. L'évaporateur à tubes enroulés a permis de réduire la consommation journalière d'électricité tout en atteignant un meilleur indice d'efficacité énergétique (IEE) par rapport à la géométrie traditionnelle en serpentin. Cette amélioration, bien que modeste en valeur, est significative sur le plan technique, car elle reflète une meilleure gestion du transfert de chaleur, une inertie thermique accrue dans la zone congélateur, et une meilleure stabilité des températures cibles, même en conditions sévères.

Au-delà de l'aspect purement énergétique, cette nouvelle conception se distingue également par ses avantages économiques. En effet, la géométrie enroulée permet une réduction notable de la masse d'aluminium utilisée, réduisant ainsi directement le coût des matières premières. Par ailleurs, la simplification du design rend possible l'automatisation partielle du processus de fabrication, ce qui contribue à réduire le temps d'assemblage, la main-d'œuvre nécessaire, et donc les coûts de production. Selon les estimations internes à l'usine, cette nouvelle géométrie permet une économie d'environ un dollar par unité produite. Rapporté à une cadence de production quotidienne de 700 réfrigérateurs, cela représente un gain journalier de 700 dollars, soit plus de 200 000 dollars par an, en tenant compte uniquement de l'économie directe sur le poste de fabrication de l'évaporateur.

Ces résultats témoignent d'une véritable optimisation technico-économique : une amélioration de l'efficacité énergétique, une réduction des coûts de production, et le tout sans compromis sur la qualité ou la conformité réglementaire. Cette triple amélioration — énergétique, économique et industrielle — souligne l'intérêt de repenser la géométrie des composants clés des systèmes frigorifiques dans une optique de performance et de durabilité.

Par ailleurs, les résultats obtenus ouvrent de nombreuses perspectives. Il serait pertinent, dans un avenir proche, d'envisager des études complémentaires, notamment sur l'optimisation des dimensions des tubes enroulés, la modélisation numérique du comportement thermique, ou encore l'analyse de la durabilité du système à long terme. L'intégration de matériaux alternatifs, plus légers ou recyclés, pourrait également renforcer la dimension écologique de cette solution.

En conclusion, ce projet démontre qu'une innovation ciblée et rationnelle dans le design d'un composant stratégique peut générer des bénéfices multiples : amélioration énergétique, réduction des coûts, et potentiel industriel. Il illustre l'importance d'un travail d'ingénierie rigoureux, fondé sur l'expérimentation, l'analyse comparative et la volonté d'innover dans un secteur où la compétitivité et l'efficacité énergétique sont devenues des enjeux majeurs. Ce mémoire constitue ainsi une contribution concrète à l'évolution des technologies de réfrigération dans une logique d'efficacité, de durabilité et de rentabilité.

Références bibliographiques:

- [1] Liebherr, “Qu’est-ce qu’un frigo à froid statique ?,” *Blog Liebherr Électroménager*, en ligne. Disponible sur : <https://blog.liebherr.com/electromenager/fr/quest-ce-quun-frigo-a-froid-statique/>, 3wani fl 1
- [2] Tosun, T., & Tosun, M. (2020). *Heat exchanger optimization of a domestic refrigerator with separate cooling circuits*. *Applied Thermal Engineering*, 168, 114810. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114810> 3wni f role evap
- [3] Reagan, S., Christen, B., Sprow, W., Peters, S. C., Wolfe, G., & Baker, M. (2019). *Tube pattern for a refrigerator evaporator* (U.S. Patent Application No. US2019/0093939A1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://www.freepatentsonline.com/y2019/0093939.html>
- [4] Demesa, N., Huicochea, A., Hernandez, J. A., & Siqueiros, J. (2017). *Heat transfer coefficients for evaporator with nested helical coils*. *International Journal of Thermal Sciences*, 121, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.08.002>
- [5] Na, S., Song, S., Lee, S., Lee, J., Kim, H., Lee, S., Choi, G., & Ahn, S. (2021). Evaporator optimization of refrigerator systems using quality analysis. *Energies*, 14(3), 555. <https://doi.org/10.3390/en14030555>
- [6] Saidur, R., Kamyar, A., Hasanuzzaman, M., & Basri, H. (2010). Performance comparison of finned tube and tube-in-coil evaporators in household refrigerators. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 1033–1039. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.010>
- [7] Patil, P. R., Thombre, S. B., & Waghmare, R. S. (2022). Experimental investigation on thermal performance of tube-in-tube heat exchangers with different coil configurations. **International Journal of Thermal Sciences**, 181, 107819. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107819>
- [8] Na, S., et al. (2021). *Evaporator optimization of refrigerator systems using quality analysis*. *Energies*, 14(3), 555. <https://doi.org/10.3390/en14030555>